UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS**

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

CRT-621

# UN SYSTÈME D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA PLANIFICATION STRATÉGIQUE DES INTERVENTIONS D'ENTRETIEN ET DE RÉHABILITATION DES CHAUSSÉES

par

Michel Gendreau
Louis-Philippe Duclos

Cette recherche a été financée par une subvention F.C.A.R-Action concertée sur l'entretien et la réhabilitation du réseau routier du Québec et par le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada.

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #621
Mars 1989

Dépôt légal - 1er trimestre 1989

## RÉSUMÉ

Nous présentons un système d'aide à la décision pour la planification à moyen et long terme des interventions d'entretien et de réhabilitation des chaussées sur un réseau routier de grande taille.

Le modèle mathématique sur lequel repose ce système est un modèle de décision markovien avec contraintes supplémentaires, semblable aux modèles utilisés dans les systèmes de gestion des chaussées de plusieurs états américains; notre modèle diffère cependant de ces modèles par le fait qu'il permet de tenir compte explicitement de la structure administrative (découpage en régions et districts) du réseau étudié.

Le système proposé se distingue aussi des autres systèmes de gestion des chaussées par l'utilisation d'un langage simple, mais puissant, qui permet au planificateur de spécifier lui-même le problème qu'il désire résoudre (horizon de planification à considérer, fonction économique à optimiser, contraintes à respecter, etc.).



**Mots-clés** : entretien routier; réhabilitation des chaussées; planification; modèle mathématique; optimisation; système d'aide à la décision.

## 1. INTRODUCTION

Les questions relatives à l'optimisation de l'entretien et de la réhabilitation des chaussées, préoccupent les organismes responsables de la conservation des infrastructures routières depuis bon nombre d'années (voir, par exemple, (1)). Pour répondre à ces questions, on a vu se développer, parallèlement avec des méthodes traditionnelles d'utilisation relativement facile, un certain nombre d'approches faisant appel à des modèles d'optimisation mathématique. Bien qu'elles soient plus complexes à mettre en oeuvre, il est maintenant généralement admis que les méthodes d'optimisation produisent des plans d'intervention plus efficients (4) et qu'elles représentent un pas en avant dans la recherche d'une meilleure allocation des ressources disponibles pour la conservation. Il paraît donc judicieux de se tourner vers de telles méthodes dans le cadre de l'effort entrepris par le ministère des Transports du Québec pour améliorer la gestion de l'entretien et de la réhabilitation des infrastructures.

Au cours des dernières années, on a assisté à une évolution rapide des modèles et des systèmes d'aide à la décision pour la planification de l'entretien et de la réhabilitation des chaussées comme en font foi les comptes rendus de "North American Pavement Management Conference" (6) et de la "Second North American Conference on Managing Pavements" (5), tenues à Toronto en mars 1985 et en novembre 1987. Cette évolution rapide ne milite pas en faveur de tentatives d'adaptation directe au réseau routier québécois des travaux réalisés à l'étranger, car elles laisseraient probablement le Québec en retard par rapport aux provinces, états et pays qui poursuivent activement des recherches dans le domaine. Qui plus est, de telles adaptations pourraient s'avérer difficiles compte tenu des spécificités du réseau québécois, notamment sa taille.

Ces diverses raisons nous ont amenés à proposer à l'automne 1987 dans le cadre de l'Action concertée sur l'entretien du réseau routier un

projet dont le but à long terme est l'élaboration d'un système d'aide à la décision original pour la planification et la programmation des interventions d'entretien et de réhabilitation des chaussées sur le réseau routier québécois. Le système envisagé est basé sur une approche de décomposition du problème combinant deux modèles d'optimisation complémentaires (2, 3) :

- un **modèle de planification stratégique** "agrégé" (c'est-à-dire dans lequel on regroupe les sections ou les sous-sections de routes pour fins d'étude) servant à déterminer une stratégie d'intervention globale - budgets, priorités, objectifs de performance, catégories d'interventions à effectuer - sur l'ensemble du réseau pour un horizon de plusieurs années;
- un **modèle de planification tactique** permettant d'établir pour chaque région ou district considéré séparément un plan d'intervention précis pour l'année à venir, en tenant compte à la fois des budgets et objectifs de performance fixés dans le modèle stratégique et des contraintes et priorités existant au niveau régional et local.

Dans la présente communication, nous présentons la structure générale du modèle et du logiciel d'aide à la décision que nous avons développés pour la planification stratégique.

## 2. PROBLÉMATIQUE GÉNERALE

Plusieurs pays et états américains, dont notamment l'Arizona (6, 7), ont mis en oeuvre au cours des dernières années des systèmes de gestion des chaussées construits autour de modèles de planification agrégés du type "modèle de décision markoviens". Cette famille de modèles repose sur une description du réseau routier à étudier dans laquelle on regroupe à chaque instant les sections présentant des caractéristiques similaires, et sur l'hypothèse d'une évolution probabiliste markovienne ("sans mémoire" d'une

période à l'autre) de l'état des chaussées dans le temps en présence ou en l'absence d'interventions d'entretien ou de réhabilitation. Les modèles de ce type, lorsqu'ils sont calibrés correctement, produisent en général une très bonne image globale du réseau sous étude et de son évolution dans le temps. De plus, ils peuvent se prêter à une reformulation sous forme de programme linéaire, ce qui, d'une part, est fort utile pour la résolution numérique et, d'autre part, permet l'ajout de contraintes linéaires de divers ordres au problème de planification.

Ces diverses raisons nous ont amené à retenir la structure générale de modèle de décision markovien avec contraintes linéaires additionnelles comme point de départ pour l'élaboration de notre modèle de planification stratégique. Dans ce modèle, nous avons cependant voulu, contrairement à ce qu'on retrouve dans les autres modèles existants, prendre en compte **explicitement** dans la formulation le découpage administratif (régions, districts) du réseau. Pour ce faire, nous avons dû ajouter un indice supplémentaire aux variables de décision qui sont alors de la forme $x^{at}_{cre}$ et qui correspondent au kilométrage moyen (ou plus précisément à l'espérance mathématique du kilométrage) de routes de catégorie **c** situées dans le district (ou la région) **r** et se trouvant dans l'état **e** au début de la période **t** auxquelles on appliquera l'intervention **a** durant cette période. Bien que le nombre de variables du modèle s'en trouve augmenté, les avantages d'un tel découpage explicite sont nombreux : d'une part, il devient possible d'imposer au niveau stratégique des contraintes définies sur la base de ce découpage (p.e. budgets annuels minimum ou maximum pour chaque district); d'autre part, dans le contexte d'un système de planification stratégique et tactique intégré, l'interface entre les deux niveaux de planification s'en trouve grandement simplifié.

Dans un autre ordre d'idées, suite à des rencontres et discussions avec des fonctionnaires du ministère des Transports du Québec impliqués dans la conservation des chaussées, il nous est apparu qu'à cause de la

complexité des facteurs à prendre en compte, un logiciel de planification stratégique implantant un modèle "étroit" complètement spécifié (en termes d'objectif et de contraintes) ne répondrait pas aux besoins du Ministère; il faudrait plutôt mettre au point un outil d'aide à la décision flexible permettant d'étudier des combinaisons diverses d'objectifs et de contraintes. Nous avons donc alors décidé d'élargir le concept de "modèle de planification stratégique" pour en faire un cadre formel large et adaptif dans lequel un planificateur puisse formuler aussi simplement que possible, à partir d'une structure de base commune, des "problèmes" dont il désire étudier et analyser la solution.

Par la suite, nous avons défini, à partir de la structure générale de modèle de décision markovien avec contraintes linéaires additionnelles décrite plus haut, un cadre descriptif formel composé de deux éléments :

1) **Un langage de description de réseaux** que le planificateur doit utiliser pour spécifier les paramètres du réseau étudié : la structure administrative (régions, districts), les catégories de routes (autoroutes, routes principales, secondaires, etc.), les états possibles des diverses chaussées, les interventions permises en fonction des états, les fonctions caractérisant les états et les interventions (indicateurs de performance, coûts, etc.), la matrice de transition décrivant l'évolution des chaussées dans le temps, l'état initial du réseau.

2) **Un langage de description de scénarios** permettant à l'usager de spécifier le problème particulier qui l'intéresse en termes de réseau à considérer, d'horizon de planification, d'objectif à optimiser, de contraintes à respecter et d'état-cible à atteindre à la fin de l'horizon. Un grand soin a été apporté à la conception de ce langage afin de le rendre à la fois puissant et simple d'usage pour un planificateur peu familier avec les modèles d'optimisation mathématique. Nous avons, entre autres, choisi pour l'expression des contraintes des règles systématiques qui permettent à l'usager de définir par un seul énoncé des

dizaines, voire même des centaines, de contraintes du modèle mathématique si celles-ci sont de nature similaire. Grâce à cela, la description d'un scénario, même complexe, ne devrait pas en général dépasser quelques dizaines d'énoncés (et parfois moins).

Nous avons préféré définir deux langages distincts pour les réseaux et les scénarios plutôt qu'un seul couvrant la description complète des problèmes, afin de simplifier le travail du planificateur désireux d'étudier une série de scénarios pour un même réseau.

Dans la section 5, nous fournirons à titre illustratif quelques exemples de description de scénarios.

## 3. FORMULATION MATHÉMATIQUE

Comme nous l'avons indiqué dans la section précédente, tout scénario peut être formulé comme un programme linéaire dans lequel les variables de décision sont des kilométrages d'intervention dans différentes conditions tout au long de l'horizon de planification. La fonction économique (l'objectif) de ce programme linéaire est spécifié par l'usager en utilisant une fonction (linéaire) définie dans la description du réseau. Pour ce qui est des contraintes, on peut les classer en deux grandes catégories:

1) **Les contraintes explicites** qui correspondent à des spécifications directes du planificateur dans la description du scénario;

2) **Les contraintes de dynamique du réseau** qui servent à décrire l'évolution du réseau dans le temps et qui peuvent être écrites à partir de la matrice de transition du réseau et du vecteur d'état initial (état du réseau au début de l'horizon de planification). Pour chaque période t dans l'horizon, on a un bloc de contraintes de la forme

$$\sum_{a \in A_{ce}} x^{at}_{cre} - \sum_{e' \in E_c} \sum_{a \in A_{ce'}} p^{ca}_{e'e} \, x^{a(t-1)}_{cre'} = 0, \text{ pour tout } c \in C,\ e \in E_c,\ r \in R$$

où $C$ est l'ensemble des catégories de routes,

$E_c$ est l'ensemble des états pour la catégorie c,

$A_{ce}$ est l'ensemble des interventions possibles pour les routes de catégorie c dans l'état e,

$R$ est l'ensemble des régions ou districts,

et $p^{ca}_{e'e}$ est la probabilité qu'une section de route de catégorie c dans l'état e' soit dans l'état e à la période suivante si on appliqu l'intervention a.

(Note : à la première période, ces contraintes prennent une forme quelque peu différente).

Dans ces contraintes de dynamique, chacun des deux termes (la sommation simple et la double sommation) correspond au kilométrage total de routes de catégorie c dans le district r se trouvant dans l'état e.

Le modèle permet aussi de définir des scénarios avec horizon de planification infini. Dans ce cas, on s'intéresse à l'état d'équilibre stationnaire à très long terme : les indices de périodes disparaissent et on n'a qu'un seul bloc de contraintes de dynamique du réseau.

## 4. LOGICIEL DE PLANIFICATION STRATÉGIQUE

Dans le contexte du modèle général défini précédemment, la résolution d'un problème de planification stratégique spécifique comporte les étapes suivantes :

1) constitution de fichiers de description du réseau et du scénario;

2) passage de la représentation-usager du problème (spécifiée par les fichiers réseau et scénario) à une représentation mathématique de celui-ci dans un format approprié;

3) résolution du problème d'optimisation mathématique;

4) présentation des résultats de la procédure d'optimisation dans une forme compréhensible pour l'usager.

Nous n'avons pas eu à développer de programme pour la résolution du problème d'optimisation, puisqu'il existe déjà des logiciels de programmation linéaire commerciaux fort efficaces et peu coûteux. Parmi ceux-ci, notre choix s'est porté sur le logiciel XMP de R.E. Marsten, notamment à cause de sa grande souplesse d'utilisation.

Jusqu'à maintenant, notre travail de développement informatique a surtout porté sur la mise au point d'un programme qui construit un fichier d'entrée pour XMP à partir des informations contenues dans un fichier réseau et un fichier scénario. Nous avons aussi complété un programme de validation de scénarios qui permet de vérifier si un fichier scénario respecte bien les règles du langage de description de scénarios et d'indiquer, le cas échéant, les énoncés erronés ainsi qu'une procédure simple pour la présentation des résultats produits par XMP.

Dans le futur, nous comptons compléter ce logiciel en y ajoutant des programmes interactifs pour la constitution de fichiers de réseaux et de scénarios et un ensemble de procédures beaucoup plus puissantes pour la présentation des résultats.

## 5. DEUX EXEMPLES

Considérons un réseau routier subdivisé en 10 districts (numérotés de 1 à 10) regroupés arbitrairement en 3 régions (no. 1 à no. 3) et comportant 3 catégories de routes (autoroutes, principales et secondaires) pour lesquelles on a défini respectivement 6, 5 et 4 états et sur lesquelles 4 interventions (rapiéçage, resurfaçage et entretien de routine et scellement de fissures - SCELLFISS) sont possibles. Supposons aussi que pour ce réseau les quatre fonctions suivantes ont été définies dans le fichier de description de réseau :

- COÛT qui donne pour chaque intervention possible le coût moyen par kilomètre en fonction de la catégorie et de l'état;

- INACCEP qui est une fonction 0-1 indiquant pour chaque état et chaque catégorie si l'état est jugé inacceptable;
- ROULEMENT qui donne la cote moyenne de roulement pour chaque état;
- KILOM qui est une fonction "bidon" valant 1 pour toutes les interventions et tous les états.

Pour minimiser le coût total du programme d'entretien et de réhabilitation sur un horizon de quatre périodes, un simple fichier de scénario long de trois énoncés est suffisant :

(1.1) RÉSEAU EXEMPLE
(1.2) HORIZON 4
(1.3) OBJECTIF MINIMISER COÛT

Il faut cependant noter que ce scénario très simple nécessite cependant 600 contraintes de dynamique du réseau (une contrainte par combinaison période-district-état : 4x10(6+5+4)).

À l'opposé de cette situation très simple, un planificateur peut spécifier un jeu de contraintes extrêmement complexe. Considérons, par exemple, le scénario suivant :

(2.1) RÉSEAU EXEMPLE
(2.2) HORIZON 4
(2.3) OBJECTIF MINIMISER INACCEP
(2.4) CONTRAINTE COÛT < 500 000
(2.5) CONTRAINTE COÛT PÉRIODE * < 150 000
(2.6) CONTRAINTE COÛT DISTRICT * > 20 000
(2.7) CONTRAINTE MOYENNE ROULEMENT AUTOROUTES PÉRIODE * > 75
(2.8) CONTRAINTE KILOM SCELLFISS PÉRIODE 1,2 < 500
(2.9) CONTRAINTE MOYENNE INACCEP CATÉGORIE * RÉGION * PÉRIODE * < 0,1

Comme l'on travaille sur le même réseau et le même réseau que précédemment, on aura ici encore 600 contraintes de dynamique de réseau, mais de nombreuses autres contraintes s'y ajouteront :

- l'énoncé (2.4) engendre une contrainte globale de 500 000 $ sur les coûts totaux du programme d'entretien et de réhabilitation;
- l'énoncé (2.5) correspond à des contraintes de budget de 150 000 $ pour chacune des périodes de l'horizon (4 contraintes en tout);
- l'énoncé (2.6) impose une borne inférieure aux dépenses d'entretien dans chacun des districts (10 contraintes);
- dans l'énoncé (2.7), on exige que la cote de roulement moyenne (sur l'ensemble du réseau) pour les autoroutes durant chacune des périodes ne soit pas inférieure à 75 (4 contraintes);
- l'énoncé (2.8) correspond à une politique de limitation des interventions de scellement des fissures à 500 km par période pour les deux premières périodes de l'horizon (2 contraintes);
- dans l'énoncé (2.9), on demande que la proportion de routes jugées dans un état inacceptable ne dépasse pas 0,1 (10 %) pour chacune des combinaisons catégorie-région-période (au total, 36 contraintes).

Il faut aussi noter que l'objectif du scénario a aussi changé et qu'on essaie maintenant de minimiser le kilométrage de routes inacceptables sur l'ensemble du réseau sur l'horizon de planification.

## 6. CONCLUSION

Nous avons défini un système d'aide à la décision qui, tout en reposant sur des pratiques et des modèles bien acceptés dans le domaine, relève d'une approche originale du problème de planification de l'entretien et de la réhabilitation des chaussées. Cette approche qui privilégie le rôle du

planificateur dans la formulation précise du modèle mathématique de planification, nous paraît très prometteuse.

Dans le futur, nous comptons compléter les travaux entrepris en nous penchant notamment sur diverses questions relatives à la présentation des résultats produits par le logiciel d'optimisation.

**Bibliographie**

1. ASSOCIATION DES ROUTES ET TRANSPORTS DU CANADA, "Guide de gestion routière", Édition Agence d'Arc Inc., Montréal, 1978.

2. GENDREAU, M., "A Decomposition Approach for Rehabilitation and Maintenance Programming", in Proceedings of the Second North American Conference on Managing Pavements, vol. 2, Toronto, 2-6 novembre 1987, pp. 2.207-2.217; publication #540, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, juillet 1987.

3. GENDREAU, M., "Une approche de décomposition pour la planification de l'entretien et de la réhabilitation des infrastructures routières", 23e congrès annuel de l'A.Q.T.R., Montréal, 22-25 mars 1988.

4. LYTTON, R.L., "Session 6: Optimization Methodologies-Introduction", in Proceedings of the North American Pavement Management Conference, vol. 2, Toronto, 18-21 mars 1985, p. 6.3.

5. "Ranking and Optimization Methodologies", in Proceedings of the Second North American Conference on Managing Pavement, vol. 2, Toronto, 2-6 novembre 1987, pp. 2.133-2.252.

6. "Session 6: Optimization Methodologies", in Proceedings of the North American Pavement Management Conference, vol. 2, Toronto, 18-21 mars 1985, pp. 6.1-6.119.

7. WAY, G.B., "Network Optimization System for Arizona", in Proceedings of the North American Pavement Management Conference, vol. 2, Toronto, 18-21 mars 1985, pp. 6.84-6.95.

8. WAY, G.B., EISENBERG, J.F. et DELTON, J.P., "Arizona's Pavement Management System", Final Report, Arizona Department of Transportation, janvier 1982.